

MAŁGORZATA TELECKA

Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej,
al. Kraśnicka 2cd, 20-718 Lublin, e-mail: rapaiti@o2.pl

Empiryczne dowody wielkiego bombardowania (LHB)
na Księżycu na podstawie danych zaczerpniętych
z *Geologicznego atlasu Księżycza*

Empirical evidence of Late Heavy Bombardment (LHB) on the Moon
based on data taken from *Geologic Atlas of the Moon*

Słowa kluczowe: Księżyc, wielkie bombardowanie, datowanie kraterów księżycowych, stratygrafia Księżycza

Key words: Moon, Large Heavy Bombardment, meteorite craters, dating of lunar craters, lunar stratigraphy

WPROWADZENIE

Badania powierzchni Księżycza trwają od czasu, gdy po raz pierwszy skierowano w jego stronę teleskopy, czyli od początku XVII wieku. Już pierwsze obserwacje przy pomocy przyrządów optycznych pozwoliły na wydzielenie kilkudziesięciu kraterów meteorytowych i innych form ukształtowania powierzchni. Regularne obserwacje Księżycza przyczyniły się do sporządzenia map, na które nanoszono kolejne odkrywane formy rzeźby.

Mapy Księżycza powstawały od początku XVII wieku. Pierwszą mapę narysował angielski astronom Thomas Hariot (Shirley 1983), umieszczając na niej około 50 struktur, z których większość była kraterami meteorytowymi. Natomiast najbardziej znaną mapą z tego okresu jest mapa utworzona przez Galileusza (Galileusz 1610). Liczba zaobserwowanych kraterów przybywała wraz z doskonaleniem przyrządów optycznych. Wkrótce odkryto, że cała widoczna powierzchnia

księżycowego globu pokryta jest strukturami impaktowymi. Badanie powierzchni Księżyca za pomocą coraz bardziej zaawansowanych teleskopów trwało aż do połowy XX wieku.

Kolejny przełom badań kraterów księżycowych nastąpił wraz z lotami kosmicznymi. Pierwsze zdjęcia powierzchni Księżyca (w tym jego niewidocznej strony) z wysokości ponad 6 tys. kilometrów wykonano w 1959 roku w czasie misji bezzałogowej sondy kosmicznej Łuna 3. Zdjęcia z sond kosmicznych umożliwiły wykonanie dokładnych map topograficznych powierzchni satelity (Siddiqi 2002). Wyścig w eksploracji Księżyca między Związkiem Radzieckim a Stanami Zjednoczonymi był z punktu widzenia nauki bardzo pożądany. Radzieckie misje kosmiczne Łuna (realizowane w latach 1958–1976) i amerykańskie – Apollo (realizowane w latach 1966–1972) pozwoliły na sporządzenie licznych map i pobranie próbek z wielu obszarów satelity. Dotychczas zrealizowano niemal osiemdziesiąt lotów mających na celu kartowanie i badanie powierzchni Księżyca. Mimo że wiele z nich nie osiągnęło planowanego celu lub skończyło się katastrofą, to dysponujemy ogromną ilością materiałów fotograficznych (Siddiqi 2002).

Analizy chemiczne i datowanie skał księżycowych wymagały miękkiego lądowania na powierzchni satelity i pobrania próbek. Pierwsze udane lądowanie nastąpiło w 1966 roku, gdy na powierzchni satelity wylądował próbnik Łuna 9, który wykonał liczne zdjęcia regolitu księżycowego (Siddiqi 2002). Pobranie próbek z powierzchni Księżyca i dostarczenie ich na Ziemię nastąpiło dopiero w roku 1969, gdy na Księżycu wylądował pierwszy pojazd załogowy Apollo 11 (Siddiqi 2002). Od tamtej pory liczne sondy bezzałogowe i statki kosmiczne z załogą dostarczały kolejnych danych o powierzchni satelity.

Wielkie bombardowanie jest interesujące nie tylko ze względu na historię Księżyca, ale również wszystkich ciał wewnętrznego Układu Słonecznego, do którego należy również Ziemia. Brak jest na powierzchni naszej planety rozstrzygających danych dotyczących czasu trwania LHB (Terrestrial Late Heavy Bombardment – TLHB) i jego nasilenia. Dostępne do badań obszary pokryte skałami sprzed około 4 mld lat zajmują jedynie 3000 km² (Ryder i in. 2000). Ich silne zniszczenie i oddziałujące na nie wielokrotnie procesy metamorficzne zatarły niemal całkowicie wszelkie dowody LHB. Jednak ze względu na fakt, że Ziemia i Księżyc tworzą układ podwójny ulegający niemal identycznym procesom badania przeprowadzane na powierzchni Księżyca można odnosić również do powierzchni naszej planety. Dlatego badania czasu trwania i nasilenia TLHB prowadzi się głównie na podstawie analizy kraterów księżycowych.

ANALIZA ROZMIARÓW I KSZTAŁTÓW KSIĘŻYCOWYCH KRATERÓW METEORYTOWYCH

Bardzo liczne i szczegółowe zdjęcia przesłane przez sondy przelatujące na niewielkich wysokościach nad powierzchnią Księżyca umożliwiły wykonanie dokładnych map jego powierzchni, wraz z licznymi strukturami poimpaktowymi (Siddiqi 2002). Mapy te pozwoliły na przeprowadzenie analiz średnicy i kształtu poszczególnych form pokolizyjnych, a także ustalenie ich zagęszczenia na danym obszarze. Większość badań dotyczących kształtu kraterów opartych jest na zbiorze map: Lunar Topographic Orthophotomaps 1:250 000 utworzonych w latach siedemdziesiątych XX wieku (Pike 1977).

Kształt kraterów spełnia zależność $y = aD^b$, gdzie y jest poszukiwanym parametrem morfometrycznym krateru, a i b są stałymi empirycznymi, a D średnicą. Stałe a i b zostały wyznaczone dla poszczególnych parametrów (np. głębokości, wysokości nasypu otaczającego krater) dla każdego z wymienionych wcześniej rodzajów kraterów (Pike 1977; Stoffler i in. 2006).

Na podstawie analiz wielkościowych przeprowadzono prognozowania dotyczące liczby kraterów o określonych średnicach. Pierwsze prognozy opublikował w 1970 roku Shoemaker (Shoemaker i in. 1970), który na podstawie danych z obszaru Mare Tranquillitatis (Morza Spokoju) wyprowadził fenomenologiczny wzór: $N = aD^{-b}$, gdzie a i b są stałymi i $b = 2,9 \pm 0,03$, D jest średnicą krateru, a N liczbą kraterów o średnicach powyżej D . Wzór ten obejmował kraterzy powyżej 100 m średnicy (Ivanov, Neukum 1995).

DATOWANIE KRATERÓW METEORYTOWYCH NA KSIĘŻYCU

Datowanie kraterów, a także analizy chemiczne powierzchni Księżyca możliwe są tylko na obszarach lądowań próbników. Pozostałe formy można analizować przez porównywanie ze strukturami poznanymi. Pierwsze analizy względnego wieku kraterów meteorytowych na Księżycu przeprowadzono już w I połowie XX wieku (Baldwin 1949). Bazowały one na zagęszczeniu i superpozycji kraterów. Obszary, na powierzchni których znajdują się skały starsze (np. nektaryjskie), mają większe zagęszczenie kraterów meteorytowych niż obszary pokryte skałami młodszymi. Wynika to z czasu ekspozycji danej powierzchni na bombardowanie. Metoda ta nadal stosowana jest na planetach typu ziemskiego, m.in. na Marsie (Stoffler, Ryder 2001). Pierwsze zdjęcia z sond kosmicznych pozwoliły na opracowanie dokładniejszych metod datowania wykorzystujących dodatkowo stopień degradacji kraterów (Stoffler, Ryder 2001; Neukum i in. 2001; Wilhelms, McGauley 1971; Wilhelms 1987).

Datowanie bezwzględne poszczególnych struktur na Księżycu wymagało pobrania próbek z jego powierzchni. Dokładny wiek kraterów meteorytowych,

w obrębie których miały miejsce lądowania, został ustalony na podstawie analiz proporcji Rb-Sr, Sm-Nd i izotopów argonu ^{40}Ar i ^{39}Ar w skałach podłoża, regolicie, materii wyrzuconej z kraterów i sferulach poimpaktowych. Ponadto wykorzystuje się analizę rozpadu uran/tor – ołów, która jest najczęściej używana przy datowaniach cyrkonu. Datowania te dotyczą jedynie obszarów, z których pobrano próby podłoża i skał. Pozostałe obszary można datować jedynie względnie (Shuster i in. 2010; Culler i in. 2000; Stoffler, Ryder 2001). Dotyczy to zarówno mórz księżycowych (m.in. Nectaris – Morze Nektaru, Crisium – Morze Przesileni, Imbrium – Morze Deszczów), jak i kraterów (np. Kopernik, Tycho, North Ray) (Stoffler, Ryder 2001).

Na podstawie tych danych i datowań względnych powstały przeglądowe mapy geologiczne powierzchni Księżyca zebrane pod wspólnym tytułem *Geologic Atlas of the Moon*, pozwalające na przypisanie kraterów do poszczególnych okresów księżycowych (Wilhelms, McGauley 1971; Marchi i in. 2012; Wilhelms i in. 1979), a także bardziej szczegółowe mapy fragmentów globu obejmujące najczęściej obszary lądowania sond, jak na przykład mapa Regionu Oppolzer (Rowan 1971).

STRATYGRAFIA KSIĘŻYCA

Badania geologiczne i datowania wykonane przez liczne sondy księżycowe pozwoliły na utworzenie, a następnie, wraz z dopływem kolejnych danych, modyfikacje księżycowej tabeli stratygraficznej. Pierwsza tabela została utworzona w roku 1959 (Wilhelms 1987), po czym uległa kilkakrotnym zmianom. Na początku lat sześćdziesiątych składała się z pięciu okresów: preimbryjskiego, imbryjskiego, procelaryjskiego, eratosteńskiego i kopernikańskiego. Od 1963 do 1970 roku na mapach geologicznych wykorzystywano tabelę podzieloną na cztery okresy: preimbryjski, imbryjski, eratosteński i kopernikański, z tym że okres imbryjski dzielono dodatkowo na dwa podokresy: młodszy – archimediański i starszy – apeniński. Do połowy lat siedemdziesiątych nie wydzielano okresu nektaryjskiego. Pojawił się on dopiero na mapach z roku 1975. Jednak większość map nie dzieliła okresu imbryjskiego na podokresy. W połowie lat siedemdziesiątych wydzielono okres nektaryjski. Obecnie stosowany podział został wprowadzony dopiero w latach osiemdziesiątych XX wieku i obejmuje pięć głównych okresów: prenektaryjski (przednektaryjski), nektaryjski, imbryjski (dolny i górny), eratosteński i kopernikański (tab. 1).

Stratygrafia księżycowa stanowi w istocie odzwierciedlenie wydarzeń katastroficznych związanych z uderzeniami dużych obiektów w powierzchnię Księżyca, uzupełnionych zdarzeniami tektonicznymi. I tak granicą między okresem prenektaryjskim i nektaryjskim jest powstanie Mare Nectaris; między okresem

nektaryjskim i imbryjskim – powstanie basenu Imbrium; między okresem imbryjskim dolnym i górnym – basenu Orientale (Morze Wschodnie) i między eratościeńskim a kopernikańskim – krateru Kopernik (Stöffler i in. 2006). Początek okresu eratościeńskiego wiązano nie z kolizjami, a z pojawieniem się law datowanych na 3,2 mld lat, ale jego nazwa pochodzi od krateru Eratostenes. Mimo iż wydarzenia graniczne dla okresów zostały ściśle określone, nadal poważnym problemem jest ich datowanie. Powstanie basenów i kraterów datowane jest różnie, co można prześledzić w tab. 2. Najwięcej datowań jest dla Mare Imbrium, dla którego oprócz wymienionych w tabeli czasów powstania można dodać jeszcze jeden: $3,75 \pm 0,02$ (Stadermann i in. 1991).

Tab. 1. Ewolucja tabeli stratygraficznej Księżyca

Tab. 1. Evolution of the stratigraphic chart of the Moon

Lata 1959–1962	Lata 1963–1970	1975 rok	Lata osiemdziesiąte
okres kopernikański	okres kopernikański	okres kopernikański	okres kopernikański
okres eratościeński	okres eratościeński	okres eratościeński	okres eratościeński
okres procelaryjski	okres imbryjski starszy – apeniński	okres imbryjski	okres imbryjski górny
okres imbryjski	okres imbryjski młodszy – archimediański		okres imbryjski dolny
okres preimbryjski	okres preimbryjski	okres nektaryjski	okres nektaryjski
		okres prenektaryjski	okres prenektaryjski

Tab. 2. Lista kraterów meteorytowych, których powstanie wiązane jest z granicami okresów na Księżycu

Tab. 2. List of craters whose formation is connected with boundaries of lunar periods

Krater	Wiek w mld lat (wg 1)	Wiek w mld lat (wg 2)	Wiek w mld lat (wg 3)	Wiek w mld lat (wg 4)
Nectaris	$3,92 \pm 0,03$	$3,92 \pm 0,03$	$4,25 \pm 0,05$	$4,1 \pm 0,1$
Imbrium	$3,85 \pm 0,02$	$3,77 \pm 0,02$	$3,92 \pm 0,05$	$3,91 \pm 0,1$
Orientale	3,72 - 3,85	3,72 – 3,77	$3,85 \pm 0,05$	-
Kopernik	$0,85 \pm 0,015$	$0,8 \pm 0,015$	-	$0,85 \pm 0,2$

1. Stöffler, Ryder (2001), Ryder, Spudis (1987), Wilhelms (1987); 2. Stöffler, Ryder (2001), Ryder, Spudis (1987), Wilhelms (1987), Deutsch, Stöffler (1987), Stadermann i in. (1991); 3. Lindsay (1976); 4. Hartman i in. (1881), Neukum, Ivanov (1994)

Konsekwencją problemów z ustaleniem czasu powstania kraterów jest brak możliwości ostatecznego wydatowania tabeli stratygraficznej. Obecnie obowiązują trzy odmienne podziały stratygraficzne zestawione w tab. 3 (Heisinger i in. 2003).

Tab. 3. Wybrane podziały stratygraficzne Księżyca

Tab. 3. Stratigraphic units of the Moon

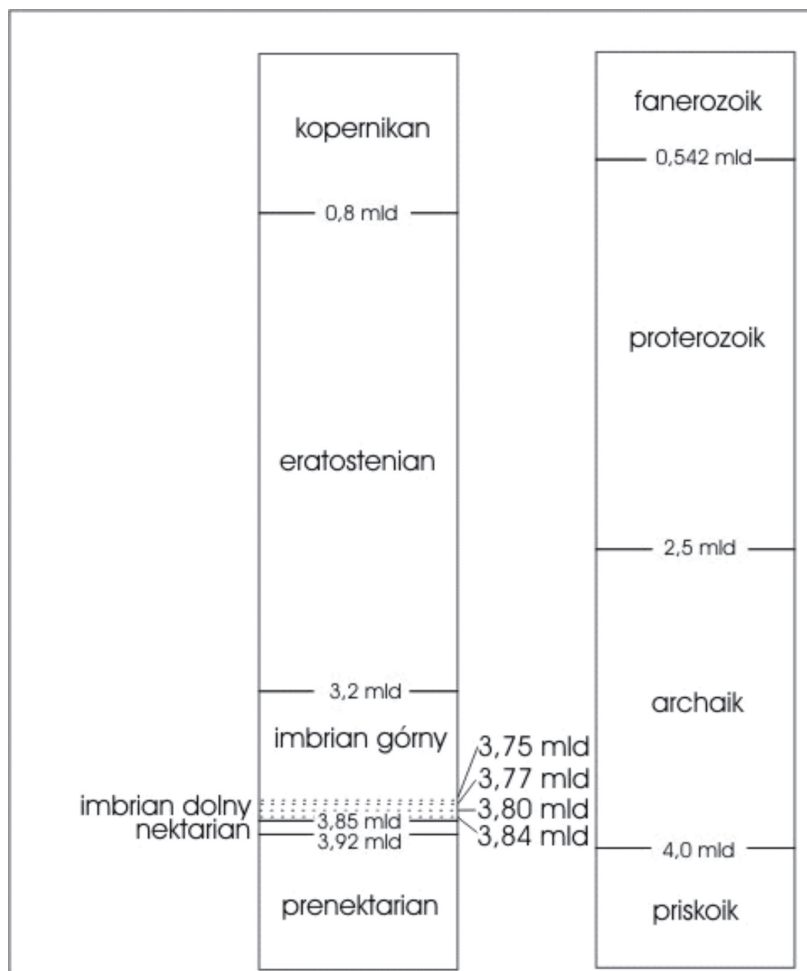
Okres księżycowy	Data rozpoczęcia w mld lat (wg 1)	Data rozpoczęcia w mld lat (wg 2)	Data rozpoczęcia w mld lat (wg 3)
Kopernikański	1,1 (0,81)	1,5 (0,85)	0,8
Eratosteński	3,2	3,2	3,2
Imbryjski górny	3,8	3,84	3,8 (3,77)
Imbryjski dolny	3,85	3,91	3,85
Nektaryjski	3,92	4,1	3,92
Prenektaryjski	4,55	4,6	4,6

1. Wilhelms (1987); 2. Neukum, Ivanov (1994); 3. Stöffler, Ryder (2001)

Na podstawie tych datowań można utworzyć najbardziej prawdopodobną tabelę stratygraficzną Księżyca (rys. 1), w której granicami okresów są powtarzające się datowania dotyczące wieku kraterów granicznych (Ryder i in. 2000). Dla lepszego wyobrażenia skali podziału stratygraficznego na Księżycu tabelę tę zestawiono z tabelą stratygraficzną Ziemi (International Stratigraphic Chart 2013, International Commission on Stratigraphy).

ANALIZA ROZKŁADU CZASOWEGO KRATERÓW – EMPIRYCZNE DOWODY LHB

Teoria opisująca wielkie bombardowanie (Late Heavy Bombardment – LHB) zarówno na Księżycu, jak i w całym wewnętrznym Układzie Słonecznym ewoluowała w czasie. Pierwotnie zakładano, że był to stały, znaczący dopływ materii, który rozpoczął się wraz z utworzeniem Księżyca (ok. 4,6–4,55 mld lat temu) i zakończył ok. 3,8 mld lat temu. Późniejsze analizy kraterów meteorytowych i law wypełniających morza księżycowe (Elkins i in. 2004) wskazują, że natężenie dopływu zmieniało się w czasie. Istnieje kilka datowań dla LHB. W niektórych pracach przyjmuje się, że początkowy napływ materii gwałtownie zwiększył się około 3,9 i zakończył około 3,8 mld lat temu (Ryder 1990). Inne datują go na 4,1/4,0–3,8 mld lat (Chambers, Lissauer 2002) lub na czas tworzenia się basenów nektaryjskich i dolnoimbryjskich (Marchi i in. 2012).



Ryc. 1. Zestawienie najbardziej prawdopodobnej tabeli stratygraficznej Księżyca i tabeli chronostratygraficznej Ziemi

Fig. 1. The most probable stratigraphic chart of the Moon compared to Earth eons

Istnieje kilka teorii tłumaczących nasilenie bombardowania około 4 mld lat temu. Obecnie najczęściej uznaje się, że LHB zostało wywołane podczas formowania się Urana i Neptuna (Duncan, Zahnle 2001) lub migracji tych planet w obrębie Układu Słonecznego (Gomes i in. 2005), co wywołało zaburzenia niewielkich ciał, które przemieszczały się w stronę Słońca, uderzając w planety wewnętrzne. Nasilonie bombardowanie mogło być również konsekwencją formowania się głównego pasa asteroid, którego elementy, nim znalazły się na stałych orbitach, ulegały licznym kolizjom (Zappala i in. 1998), lub następstwem grawi-

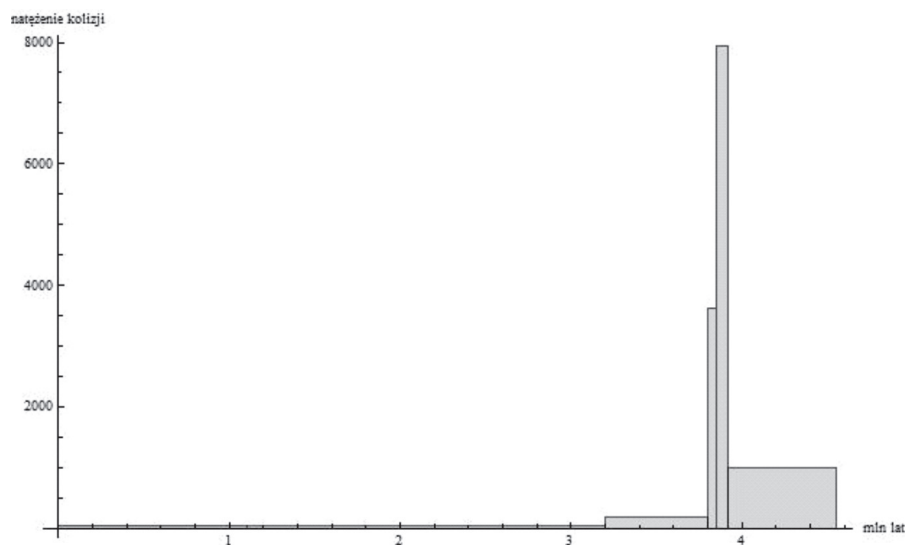
tacyjnego wybijania materii przez masywne ciało, które znalazło się w obrębie Układu Słonecznego, zaburzając równowagę małych obiektów (Wetherill 1975). Czynnikiem sprawczym mogło być także zaburzenie pasa głównego wywołane przez piątą planetę typu ziemskiego, której orbita położona była między orbitami Marsa i Jowisza. Zgodnie z tym modelem orbita piątej planety prawdopodobnie była początkowo niemal okrągła, a następnie zmieniła się na silnie wydłużoną, przecinając pas główny. Planeta ta utrzymywała się na tym torze przez około 600 mln lat, zaburzając ruch asteroid, po czym uderzyła w Słońce (Chambers, Lissauer 2002).

Na okres LHB datowane są liczne baseny i kratery księżycowe, m.in.: Nectaris (3,92 mld), Crisium (3,89 mld), Serenitatis (3,89 mld), Imbrium (3,85 mld), Orientale (3,72–3,85 mld), Descartes (3,9 mld), Calvey (3,98 mld), Fra Mauro (3,91 mld) (Stoffler, Ryder 2001). Gwałtowny wzrost dopływu materii widoczny jest również na wykresach przedstawiających zmiany nasilenia bombardowania (ryc. 2–7).

Aby zilustrować zmiany nasilenia bombardowania powierzchni Księżyca przez materię kosmiczną, należy zliczyć kratery meteorytowe dla poszczególnych okresów. Ze względu na niejednorodną konwencję map geologicznych Księżyca w tej pracy ograniczono się do dwóch jednolitych pod względem oznaczeń map, obejmujących obszar od szerokości 45°N do bieguna północnego (Lucchita 1978) i od 45°S do bieguna południowego (Wilhelms i in. 1979), co daje 50% powierzchni satelity.

Na mapach w skali 1:250 000 możliwe jest wydzielenie kraterów o średnicach powyżej kilku kilometrów. Każdemu z okresów geologicznych przypisana jest barwa: prenektaryjskiemu – brązowa, nektaryjskiemu – pomarańczowa, imbryjskiemu – niebieska, eratosteńskiemu – zielona i kopernikańskiemu – żółta. Nie wszystkie obszary Księżyca zostały przypisane do konkretnego okresu. Część z nich nie została wydatowana, a zatem nie przypisano im żadnej barwy. W tej pracy zliczono jedynie te kratery, którym została przypisana barwa odpowiadająca danemu okresowi. Są to w większości kratery o średnicach powyżej 20 km. Zliczenie to dało prawie 1600 kraterów pojedynczych.

Nasilenie bombardowania oblicza się, dzieląc liczbę kolizji w danym okresie przez długość tego okresu. W zależności od przyjętego datowania granic okresów księżycowych różny jest rozkład nasilenia bombardowania powierzchni Księżyca, co widoczne jest na ryc. 2–7. Do wykonania rysunków wykorzystano jedynie kratery pojedyncze. Zostały one tak wykonane, że pole powierzchni pod wykresem odpowiada liczbie kraterów meteorytowych w danym okresie, natomiast podstawa jest równa długości trwania okresu liczonej w miliardach lat. Liczba kraterów dla danego okresu jest stała, natomiast długość trwania okresu zmienia się w zależności od datowania.

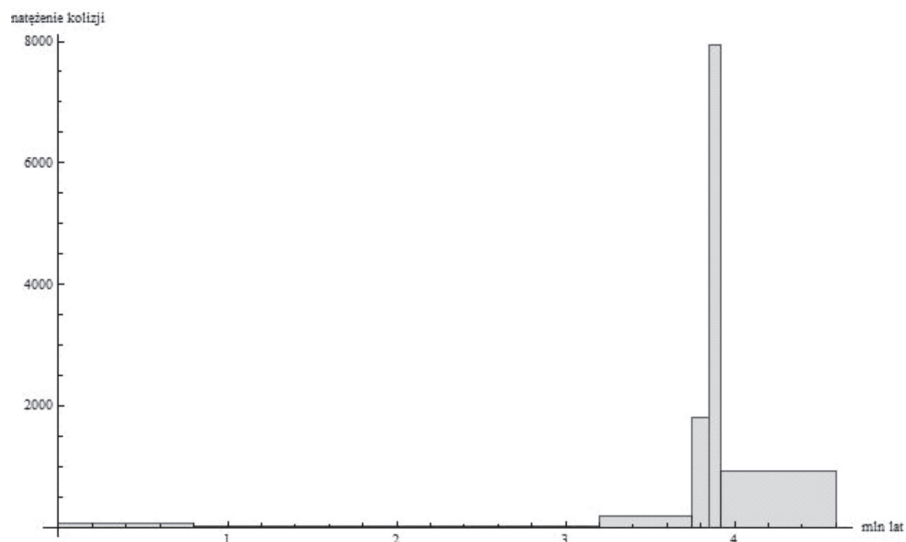


Ryc. 2. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych na Księżycu zgodnie z datowaniem Wilhelmsa (1987) dla granicy kopernikan–eratostenian 1,1 mld lat

Fig. 2. Intensity of meteorite collisions dated according to Wilhelm (1987): Copernician – eratosthenian boundary 1.1 Gyr

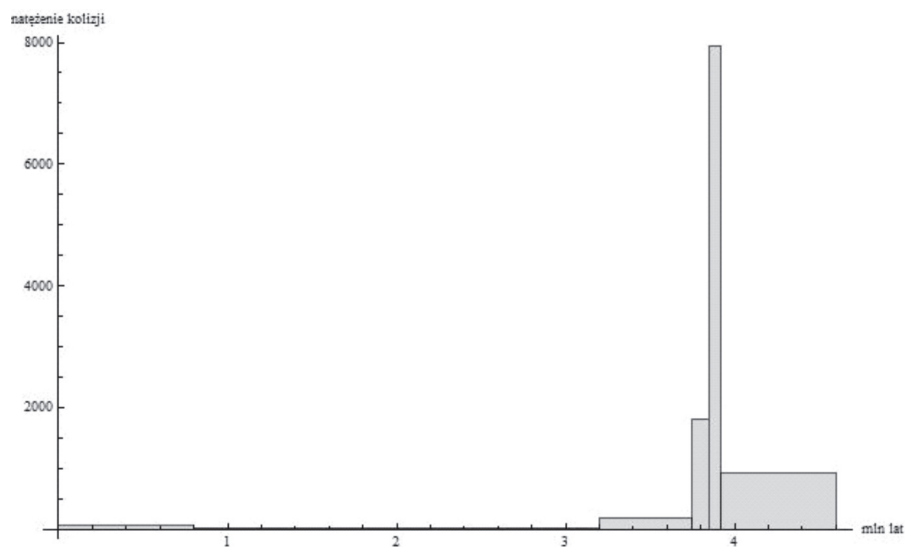
W większości przypadków maksimum bombardowania przypada na przedział 3,92–3,85, widoczny na wykresach przedstawiających natężenie bombardowania zgodne z datowaniem Wilhelmsa (ryc. 2) oraz Stöffera i Rydera (ryc. 5 i 6), a także w przypadku wykresu jednego z datowań prawdopodobnych (ryc. 4). Jest to okres trwający zaledwie 70 mln lat, po którym bombardowanie powierzchni Księżyca spada o ponad połowę w stosunku do wcześniejszego. W przypadku datowań Neukuma i Ivanowa (1995) (ryc. 2) okres o największym nasileniu kolizji trwał od 4,1 do 3,91 mld lat (190 mln lat), po czym następuje niewielki spadek nasilenia bombardowania trwający do 3,84 mld lat, co daje w sumie 260 mln lat trwania LHB. Wyjątkowy pod tym względem jest wykres przedstawiony na ryc. 7, dla którego okres o największym dopływie materii kosmicznej zawiera się w przedziale 3,85–3,84 mld lat (dolny imbrian) i jest ponad dwa razy większy niż dopływ materii w okresie nektaryjskim (dla tego datowania 3,92–3,85 mld lat).

Dane uzyskane na podstawie powyższych zliczeń pokazują, że najwięcej kolizji miało miejsce w prenektarianie (39,8%), nieznacznie mniej w nektarianie (35,4%). Należy jednak pamiętać, że czas trwania prenektarianu wynosi 680 mln lat (15% wieku Księżyca), natomiast nektarianu tylko 70 mln lat (1,5% wieku Księżyca). Oznacza to, że natężenie kolizji materii kosmicznej było znacznie wyższe w nektarianie niż w okresie poprzedzającym.



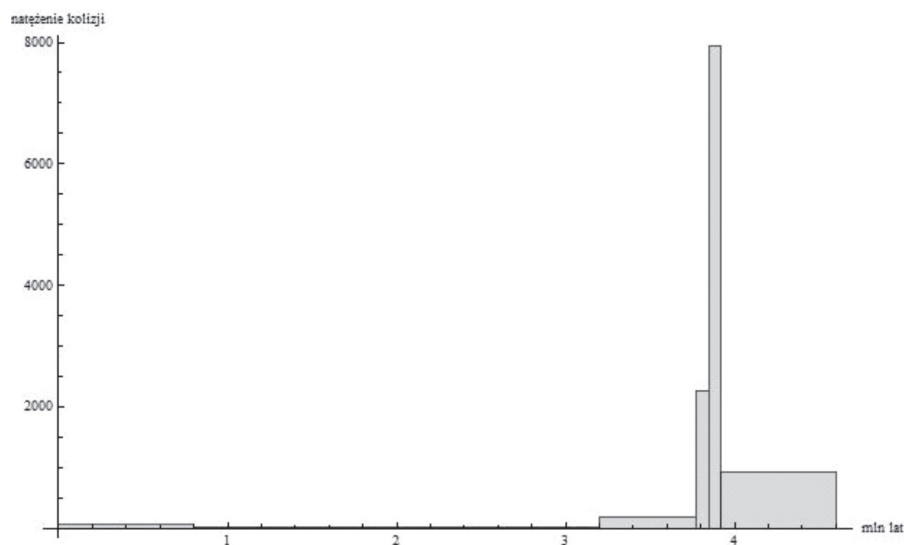
Ryc. 3. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych zgodnie z datowaniem Neukuma, Ivanowa (1995) dla granicy kopernikan-eratostenian 1,5 mld lat

Fig. 3. Intensity of meteorite collisions dated according to Neukum and Ivanov (1995): Copernician-Eratosthenian boundary 1.5 Gyr



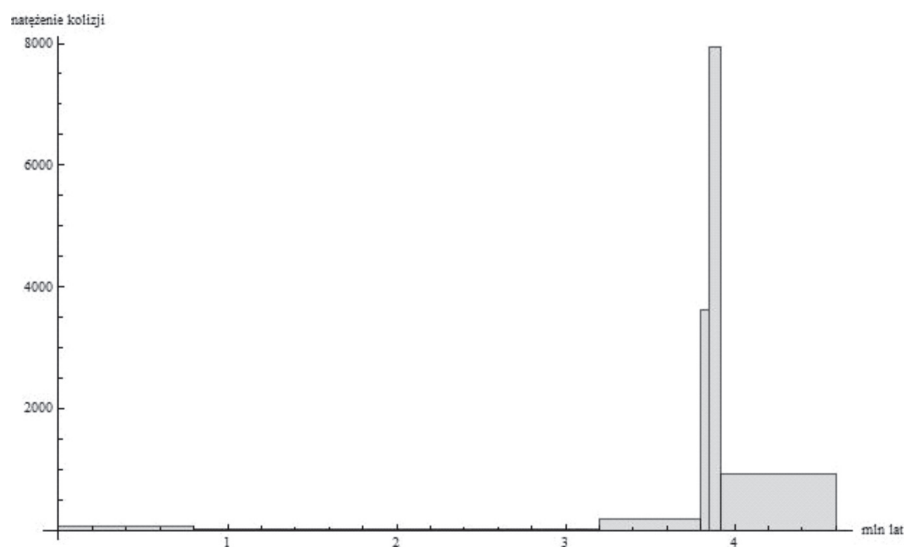
Ryc. 4. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych dla datowania najbardziej prawdopodobnego. Granica między okresem imbryjskim dolnym i górnym 3,75 mld lat

Fig. 4. Intensity of meteorite collisions for the most probable dating: Ealy - Late Imbrian boundary 3.75 Gyr



Ryc. 5. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych zgodne z datowaniem Stöfflera i Rydera (2001), będącym jednocześnie datowaniem najbardziej prawdopodobnym dla granicy między okresem imbryjskim dolnym i górnym 3,77 mld lat

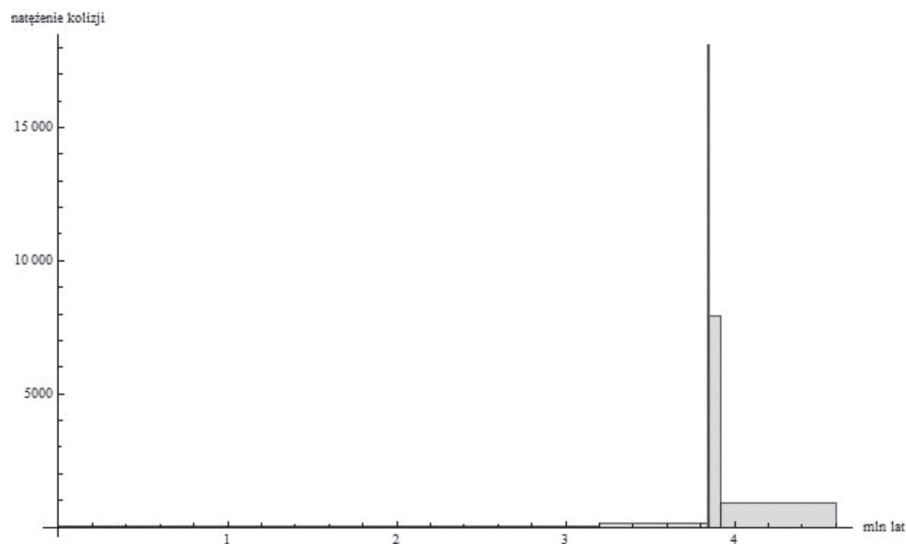
Fig. 5. Intensity of meteorite collisions dated according to Stöffler, Ryder (2001): Early – Late Imbrian boundary 3.77 Gyr



Ryc. 6. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych zgodne z drugim datowaniem Stöfflera i Rydera (2001), będącym jednocześnie datowaniem najbardziej prawdopodobnym dla granicy między okresem imbryjskim dolnym i górnym 3,8 mld lat.

Fig. 6. Intensity of meteorite collisions dated according to the second Stöffler, Ryder dating (2001): Early – Late Imbrian boundary 3.8 Gyr

Sumaryczny procentowy udział kolizji w dwóch najbardziej aktywnych pod względem bombardowania okresach wynosił prawie 47% w czasie zaledwie 120 mln lat (2,6% wieku Księżyca). Oznacza to, że zjawisko wielkiego bombardowania (LHB) jest wyraźnie czytelne w zapisie kolizji na powierzchni satelity. Okres po wielkim bombardowaniu to niemal 83% wieku Księżyca. Kraterów powstałych po LHB jest około 13%, natomiast młodszych niż 3 mld lat – zaledwie 6,7%.



Ryc. 7. Zmiany natężenia kolizji kosmicznych zgodnie z datowaniem najbardziej prawdopodobnym dla granicy między okresem imbryjskim dolnym i górnym 3,84 mld lat

Fig. 7. Intensity of meteorite collisions for the most probable dating: Early – Late Imbrian boundary 3.84 Gyr

Podobne wyniki uzyskuje się również za pomocą modeli teoretycznych opartych na zupełnie innych założeniach. Model zaproponowany przez Neukuma i innych (Ivanov, Neukum 1995; Neukum i in. 2001; Neukum 2008) oparty jest na rozkładzie zależności pomiędzy rozmiarem a częstością pojawiania się kraterów o danej średnicy. Jest to tak zwany model SDF – size-frequency distribution (Ryder 1990; Ivanov, Neukum 1995; Neukum 2008; Michael, Neukum 2010). Zgodnie z tym modelem procentowy udział kraterów młodszych niż 3 mld lat wynosi ok. 5%, co potwierdzają wyniki empiryczne zawarte w tej pracy.

WNIOSKI

Wielkie bombardowanie (LHB) jest wyraźnie czytelne w zapisie geologicznym Księżyca. Mimo iż dane ilościowe można traktować jedynie jako przybliżenie

faktycznej liczby kolizji, dają one wiarygodny obraz zmian nasilenia impaktów meteorytowych na jego powierzchni. Maksimum natężenia kolizji kosmicznych przypada na okres nektaryjski i imbryjski dolny. Choć liczba kraterów przypisanych do danego okresu jest stała, długość trwania LHB może być różna. Uzależniona jest ona od dwóch czynników: czy za wielkie bombardowanie przyjmuje się cały okres wzmożonego dopływu materii kosmicznej, czy jedynie absolutny pik natężenia kolizji, a także od datowania granic okresów.

W przypadku gdy uwzględniamy absolutne maksimum kolizji, LHB może ograniczać się jedynie do dolnego imbrianu, natomiast jeżeli uwzględnimy wyraźne nasilenie kolizji w stosunku do okresów sąsiednich, co widać na jednym z wykresów (ryc. 7), LHB obejmuje dwa okresy: nektarian i imbrian dolny.

W zależności od datowania granicy imbrian dolny-górny zmienia się czas trwania LHB. Jeżeli przyjmiemy za LHB tylko absolutne maksimum natężenia kolizji, czas jego trwania zmienia się od zaledwie 10 mln lat (jest to najmniejsza możliwa długość trwania imbrianu dolnego, gdy przyjmujemy datowanie granicy imbrian dolny-górny na 3,94 mld lat) do 70 mln lat (gdy LHB obejmuje jedynie okres nektaryjski).

Jeżeli za LHB uznamy dwa okresy o największym natężeniu kolizji, to jego długość zmienia się jeszcze bardziej: od 80 mln lat, gdy przyjmiemy dolną granicę nektarianu na 3,92 mld lat i górną granicę imbrianu dolnego na 3,84 mld lat, do 350 mln lat, gdy przyjmiemy początek nektarianu na 4,1 mld lat, natomiast koniec imbrianu dolnego na 3,75 mld lat.

Dokładne określenie długości LHB możliwe byłoby zatem po ustaleniu czasu trwania nektarianu dolnego, czyli określeniu granicy między okresem imbryjskim dolnym i górnym. Oznacza to, że kluczowym zadaniem geologii Księżyca badającej Late Heavy Bombardment jest dokładne określenie wieku granicznego basenu Mare Orientale. Przewycięzenie tych trudności pozwoliłoby na uzyskanie pełniejszego obrazu bombardowania zarówno na Księżycu (który jest najłatwiejszy do zbadania ze względu na niewielką odległość, brak atmosfery i brak aktywnego wulkanizmu), jak i na pozostałych ciałach w wewnętrznym Układzie Słonecznym (z których dane są mniej liczne, jak na przykład Mars czy Wenus, lub uzyskanie danych jest niemożliwe ze względu na erozję, wulkanizm i tektonikę, jak na przykład Ziemia). Dopóki jednak nie uzyskamy dokładnych danych, należy liczyć się z przedstawionymi powyżej trudnościami i niejednoznacznymi interpretacjami czasu trwania poszczególnych okresów księżycowych i długości wielkiego bombardowania.

LITERATURA

- Baldwin R. B., 1949: *The Face of the Moon*. University of Chicago Press, Chicago.
- Chambers J. E., Lissauer J. J., 2002: *A new dynamical model for the lunar late heavy bombardment*. Lunar and Planetary Science, 33: 1093.
- Culler T. S., Becker T. A., Muller R. A., Renne P. R., 2000: *Lunar impact history from ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of glass spherules*. Science, 287: 1785–1788.
- Deutsch A., Stoffler D., 1987: *Rb-Sr analyses of Apollo 16 melt rocks and a new age estimate for the Imbrium basin: Lunar basin chronology and the early heavy bombardment of the Moon*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51: 1951–1964.
- Duncan M. J., Zahnle K., 2001. *Could the lunar late heavy bombardment have been triggered by the formation of Uranus and Neptune?* Icarus, 151: 286-306.
- Elkins-Tanton L. T., Hager B. H., Grove T. L., 2004: *Magmatic effects of the lunar late heavy bombardment*. Earth and Planetary Science Letters, 222: 17–27.
- Ivanov B. A., Neukum G., 1995: *Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data*. Hazards due to Comets and Asteroids, 359–416.
- Galileo Galilei, 1610, Sidereus Nuncius.
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A., 2005: *Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets*. Nature Letters, 435: 4660469.
- Hiesinger H., Head III J. W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G., 2003: *Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum*. Journal of Geophysical Research, 108 (E7): 1–27.
- Lindsay J. F., 1976. *Lunar stratigraphy and sedimentology*. Developments in Solar System and Space Science, 3: 1–302.
- Lucchitta B. K., 1978: *Geologic map of the north side of the Moon*. Geologic Atlas of the Moon 1:5000 000.
- Marchi S., Bottke W. F., Kring D. A., Morbidelli A., 2012: *The onset of the lunar cataclysm as recorded in its ancient crater populations*. Earth and Planetary Science Letters, 325–326: 27–38.
- Michael G. G., Neukum G., 2010: *Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty*. Earth and Planetary Science Letters, 294: 223–229.
- Neukum G., 2008. *The lunar and martian cratering records and chronologies*. Lunar and Planetary Science, 39: 2509.
- Neukum G., Ivanov B. A., Hartmann W. K., 2001: *Cratering records in the inner Solar System in relation to the lunar reference system*. Chronology and Evolution of Mars, 96: 55–86.
- Pike R. J., 1977: *Apparent depth/apparent diameter relation for lunar craters*. Proceedings of the Lunar Science Conference 8th, pp. 3427–3436.
- Rowan L. C., 1971: *Geologic map of the Oppolzer a region of the Moon*. Lunar orbiter site II p-8, sinus medii including Apollo landing sites 3 and 3r. 1:100 000. Geologic Atlas of the Moon.
- Ryder G., 1990: *Lunar samples, lunar accretion and the early bombardment of the moon*. Eos, 71 (10) 313032.
- Ryder G., Koeberl C., Mojzsis S. J., 2000: *Origin of the Earth and Moon*, chapter: Heavy Bombardment of the Earth at 3,85 Ga: The Search for Petrographic and Geochemical Evidence. University of Arizona Press, Tuscon.
- Ryder G., Spudis P., 1987: *Chemical composition and origin of Apollo 15 impact melts*. Proceedings of the 17th Lunar and Planetary Science Conference, Part 2, Journal of Geophysical research, 92 (B4): E432–446.
- Shirley J. W., 1983: *Thomas Harriot, a Biography*. Oxford University Press.

- Shoemaker E. M., Hait M. H., Swann G. A., Schleicher D. L., Dahlem D. H., Schrabar G. G., Sutton R. L., 1970: *Lunar regolith at tranquillity base*. Science, 167, 4520455.
- Shuster D. L., Balco G., Cassata W. S., Fernandes V. A., Garrick-Bethell I., Weiss B. P., 2010: *A record of impact preserved in the lunar regolith*. Earth and Planetary Science Letters, 290: 155–165.
- Siddiqi A. A., 2002: *Deep Space Chronicle. A chronology of Deep Space and Planetary Probes 1958-2000*, volume Monographs in Aerospace History 24. NASA, Washington.
- Stadermann F. J., Heusser E., Jessberger E. K., Lingner S., Stoffler D., 1991: *The case for a younger imbrium basin: New Ar40-Ar39 ages of Apollo 14 rocs*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55: 2339–2349.
- Stoffler D., Ryder G., 2001: *Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner Solar System*. Space Science Reviews, 96: 9–54.
- Stoffler D., Ryder G., Ivanov B. A., Artemieva N. A., Cintala M. J., Grieve R. A. F., 2006: *Cratering history and lunar chronology*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 60: 519–596.
- Wetherill G. W., 1975: *Late heavy bombardment of the Moon and terrestrial planets*. Proceeding of the 6-th Lunar and Planetary Science Conference, pp. 1539–1561.
- Wilhelms D. E., 1987: *The geologic history of the Moon*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1348. United States Government Printing Office, Washington.
- Wilhelms D. E., Howard K. A., Wilshire H. G., 1979. Geologic map of the south side of the Moon 1:5000 000. Geologic Atlas of the Moon.
- Wilhelms D. E., McGauley J. F., 1971: *Geologic map of the near side of the moon 1:5 000 000*. Geologic Atlas of the Moon.
- Zappala V., Cellino A., Gladman B. J., Manley S., Miglioroni F., 1998: *Asteroid showers on Earth after family breakup events*. Icarus, 134: 176–179.

SUMMARY

Lunar cratering chronology is a basis for chronology of meteorite impacts on Mars, Earth and on the other terrestrial planets. Moon is a calibration plate for cratering record for all inner solar system. There are two methods of preparing lunar flux curve: theoretical size-frequency distribution (SFD) proposed by Neukum et al. (2001) and empirical, based on the samples collected by the space probes Apollo and Luna. In this paper I checked empirically SFD method based on two maps: *Geologic Map of the North Side of the Moon* (1978) and *Geologic Map of the South Side of the Moon* (1979) collected in the *Geologic Atlas of the Moon*. There was count all craters dated on the each of the lunar stratigraphic units.

Boundaries of the lunar geologic units are related to impact structures and lava flows. The most problematic is the age of these forms. Most of the known ages of the lunar basins and craters which are the limits of the stratigraphic units (Nectaris, Imbrium and Orientale basins and Copernicus crater – Table 1) were compared in this paper. If the number of craters in the lunar geological period is constant, duration of the geological units affects the diagram of the impact flux (Fig. 3–8). The period with the most intensive frequency of meteorite collisions is called Large Heavy Bombardment (LHB), but, as we see on figures 3–8, it changes depending on the used data. The length and boundaries of LHB period is a clue to understanding of early evolution of terrestrial planets and inner solar system.